第39卷 第1期
2022年1月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 39 No. 1
Jan. 2022

气候变化及景观格局与生态系统碳储存的耦合关系
——以祁连山为例

王让会， 赵文斐， 彭 擎， 刘春伟， 周丽敏， 田 畅

（南京信息工程大学应用气象学院，江苏 南京 210044）

摘 要：气候变化及景观格局与生态系统的结构、功能及动态变化密切相关。祁连山生态系统(QLME)是中国重要的生态功能区，基于多元数据，运用遥感及GIS技术，结合InVEST及GeoSOS-FLUS模型，探索CSET与方法，实现对QLME碳储存的估算。定量估算及分析表明：（1）不同景观类型背景下QLME碳储存具有明显的时空差异性，QLME碳储存最高为草地及林地景观，其次为裸地，而耕地、湿地、建设用地以及农村居民点景观的碳储存较小。1985—2018年间，QLME碳储存变化总体呈增长趋势，增加了4805.95×10^4 t，年增长率为38.43%。（2）草地景观碳储存占研究区50%以上，其碳储存呈先增后减趋势，林地景观碳储存占总碳储存的11.31%~36.16%，变化幅度较大。（3）基于未来RCP4.5及RCP8.5气候变化情景，QLME碳储存趋于增加，2050年平均碳储存量为3813.38 t·km^{-2}，较2018年增长了8.69%。该研究对于进一步认识碳循环规律及其生态系统稳定性具有重要意义。

关键词：祁连山生态系统(QLME)；气候变化情景；碳储存估算技术(CSET)；生态系统服务价值评估技术；景观格局；模型

全球变化背景下，生态系统发生了一系列变化。联合国倡导的MA计划，为人们科学认识生态系统的结构、功能、动态变化提供了重要基础，也为进一步开展不同类型生态系统生态过程机制研究，生态系统服务功能评估以及碳源/汇监测与分析提供了重要支撑。随着人们对碳减排、碳达峰与碳中和问题的日益关注，山地生态系统在全球变化中的地位与作用备受重视。祁连山作为中国西部干旱区的重要生态屏障，在实施"一带一路"倡议的背景下，维护区域生态系统功能，对于本区域及相关区域的生态建设、环境保护与社会经济发展具有重要的现实意义。气候变化背景下，尽管温度控制着中高纬度地区土壤有机碳储量，但热带地区的水文气候可能是土壤碳存留的主要驱动要素[1]。全球森林生态系统碳库具有极大的复杂性[2]，森林水分利用率与大气CO_2具有密切联系[3]，模型模拟方法在估算NPP等生态系统参量方面具有重要的地位与作用[4-5]。目前，人们围绕着生态系统的服务价值评估、生态系统碳储存估算问题，探索了诸多方法[6-7]。在诸多碳储量估算的方法中，价值量评估法、物质量评估法、能值分析法是具有重要意义的评估方法，而生态模型法则是近年来发展活跃的热点方向。随着生态信息科学、环境信息科学以及地理信息科学的发展，生态系统服务的评估方法以及碳储存、碳收支与碳源/汇的估算方法逐渐与生态模型相关联，并进一步深化[7-8]。目前，人们关注的生态系统模型包括InVEST、ARIES、SoLVES等模型，其中，InVEST模型被广泛使用[9-11]。实际应用中，InVEST模型的众多模块被梳理为不同的类型，一类是支持生态系统服务功能模块，如生境质量、生境风险评估等模块，另一类则是最终生态系统服务模块，包括碳储存、水源涵养、水质净化和土壤保持等服务功能，这些生态系统服务功能不同程度地服务于人类社会[12-14]。

祁连山山地生态系统(QLME)具有多种资源，在维持生态安全方面有着极其重要的战略地位。近年来，受气候变化特别是过度放牧、矿产开采、违规建造、旅游观光等强度人类活动的影响，祁连山地区出现了天然林草植被退化、水土流失频发、冰雪覆盖区不断缩小以及生物多样性减少等问题[15-17]。在

收稿日期：2021-06-22； **修订日期：**2020-10-22
基金项目：国家重点研发计划(2019YFC0507403)
作者简介：王让会(1963-)，男，博士，教授，主要从事地理学及生态学领域的研究工作. E-mail: rhwang@nuist.edu.cn

国家大力遏制祁连山生态环境恶化一系列战略决策实施的背景下,进一步研究气候变化情景下QLME生态服务功能动态变化,并估算不同时空尺度碳储存的变化,对于全面揭示QLME稳定性规律,科学评价QLME综合环境效应,具有重要理论价值。同时,本研究对于探索QLME碳储存的影响要素,揭示碳循环等生物地球化学循环规律,完善CSET、生态系统服务价值估算技术、生态系统生境质量评价技术等一系列山地生态系统生态环境演变与质量评价的技术体系,也具有重要的理论价值;从长远而言,对于国家倡导以国家公园为主体的自然保护地建设以及绿色低碳发展亦具有重大的现实意义。

1　研究区域及数据来源

本研究所涉及的祁连山生态系统(QLME)位于95°06′~103°01′E,36°40′~39°42′N,处于青藏、黄土和蒙新高原交汇地带,总面积为5.02×10⁴ km²。研究区属于山地峡谷地貌,西高东低,海拔1767~5604 m,涵盖了林地、草地、湿地、荒漠、冰川积雪等生态景观类型。研究区北部沿河西走廊一带为典型的温带大陆性气候,南部则属于高寒半干旱气候,年降水量为96.4~729.6 mm,时空变差较大;作为黑河、疏勒河以及石羊河等众多水系的产集水区,水资源的形成、转化与消耗具有独特的规律,冰川积雪、林地等生态子系统提供着重要的水源涵养服务功能。QLME土壤类型涵盖了黑毡土、冷钙土和寒冻土等30多种土壤类型;植被在不同海拔梯度区间呈现垂直景观分布规律,随着海拔的逐步升高,自然景观格局特征明显;从下往上可分为山地森林景观带、山地草原景观带、亚高山灌丛景观带、亚高山亚冰雪植被稀疏景观带等,植被主要为青海云杉、祁连圆柏等林木,以及鞭麻、山柳等灌木[18](图1)。

为了实际应用CSET及方法,需要多源数据的支撑。不同的数据有不同的属性及其来源,并在InVEST模型与GeoSOS-FLUS模型中发挥着不同的作用。研究综合利用气象数据、未来气候情景数据、土地利用/覆盖数据、地形数据、土壤数据和文献统计数据,经过各种预处理得到InVEST和GeoSOS-FLUS模型的输入数据。除了从实际调查中获得QLME不同生态景观类型的基本信息外,在碳储存估算及分析中,还采用了一系列的多源数据。通过国家青藏高原科学数据中心获取土地利用/覆被、植物可利用水含量、土壤最大根系深度栅格数据,并利用ArcGIS软件重分类、重采样等方法进行处理;通过中国气象科学数据共享服务网获取年降水量、年潜在蒸散量栅格数据,并分别通过ANUSPLIN软件进行插值及Penman-Monteith法计算插值进行处理;通过资源环境科学数据云平台获取次级流域边界矢量数据及DEM栅格数据,并通过ArcGIS软件水文分析模块进行数据处理;基于DEM数据,利用ArcGIS软件3D Analyst工具,获得坡度坡向栅格数据;道路铁路及城镇居民点矢量数据,来源于全国基础地理信息数据库,并利用ArcGIS软件距离分析模块求得要素的欧氏距离获得。根据InVEST模型及GeoSOS-FLUS模型对基础数据的要求,各类数据进行不同的预处理后,通过模型进一步反演相关的生态景观要素。

2　研究技术与方法

基于QLME的自然地理状况,在遥感地学分析的基础上,结合宏观调查与典型研究,获得生态系

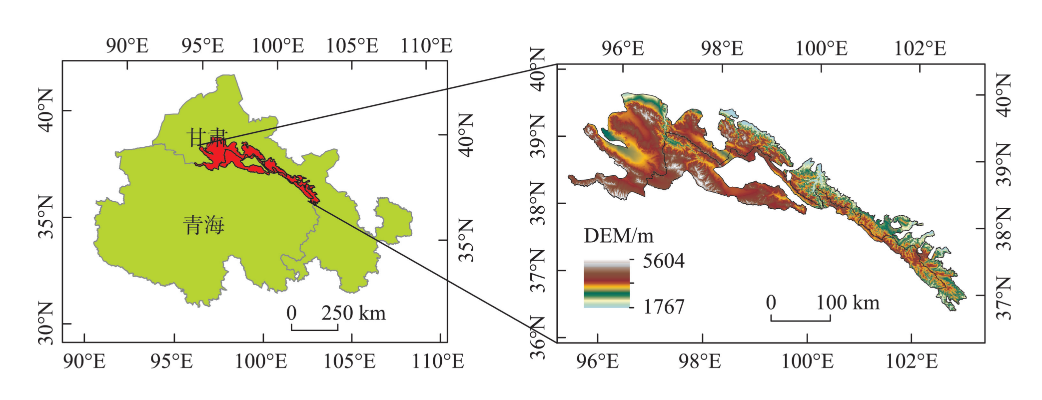


图1　QLME地理位置示意图

Fig. 1　Geographical location of QLME

统属性特征,进一步通过InVEST模型,估算生态系统的碳储存,分析其环境效应。

2.1 碳储存估算技术(CSET)

围绕QLME碳储存的估算问题,基于InVEST模型,探索了CSET与方法,实现对山地生态系统碳储存的估算。具体而言,InVEST模型中的碳储存模块分为地上生物碳库、地下生物碳库、土壤碳库、死亡有机碳库4个基本碳库。要估算各类形式碳储存量,需要不同类型的数据支撑。前述相关数据来源是基于InVEST模型特点,分析生态系统结构,定量估算碳储量的前提条件。在此基础上,充分分析QLME生物与环境要素特点,运用遥感及ArcGIS平台,获得区域不同生态景观类型的量化数据;对不同地类4种碳库的平均碳密度进行统计,然后用各个地类的面积乘以其碳密度并求和,得出研究区的总碳储存。

2.2 GeoSOS-FLUS模型方法

GeoSOS-FLUS模型主要分为2个模块,其一是以ANN为基础的适宜性概率计算模块;其二是根据自适应惯性机制建立的元胞自动机模块。在适宜性模块中输入某一期研究区土地利用分类数据以及土地利用变化驱动因子(如地形、居名点、道路分布等),并通过ANN计算得到研究区各地类适宜性概率。

3 QLME碳储存特征分析

3.1 碳储存时空变化特征

基于前述CSET与方法,对QLME不同年代的碳储存进行估算,表1为1985—2018年QLME碳储存变化。

表1 不同年度QLME碳储存变化特征

Tab. 1 Change characteristics of QLME carbon storage in different years

年份	碳储存总量/10^4 t	平均碳储存/(t·km^{-2})	变化率/%
1985	12506.18	2533.00	–
1990	12442.41	2520.08	−0.51
1995	12471.02	2525.88	0.23
2000	13301.62	2693.83	6.66
2005	14058.85	2847.53	5.69
2010	13785.72	2793.01	−1.94
2015	17334.58	3513.08	25.74
2018	17312.13	3508.53	−0.13

从表1可知,QLME碳储存变化总体呈增长趋势,增加了4805.95×10^4 t,多年平均碳储存为14151.56×10^4 t,年增长率为38.43%。从时间序列而言,1985—2010年增长速度缓慢,碳储存增加了1279.54×10^4 t,增长率为10.23%,占研究区碳储存总增长量的26.62%;而2010—2018年碳储存的增长速度明显加快,增加了3526.40×10^4 t,增长率为25.58%,占总增长量的73.38%。1990年QLME平均碳储存为2520.08 t·km^{-2},2000年与2015年平均碳储存分别为2693.83 t·km^{-2}和3513.08 t·km^{-2}。

事实上,造成QLME碳储存时空差异的原因较为复杂,自然要素及人为活动均具有不同的影响。从时间序列而言,如前所述,QLME主要以祁连圆柏与青海云杉等为主要乔木树种,处于该生态系统中的灌丛与草本植物,受国家生态环境保护政策及林业经营策略的调整,多年来总体处于保护状态;同时,区域水文、气候、土壤等条件与之长期适应,生物的生物量具有累积效应;碳作为生物量中的主要组成部分,在这种背景下总体处于增加态势。特别是2015年的碳储存达到了1985年以来的最大值;但也就是在这个时段前后的时间段,无序矿产开采、规模化旅游以及过度放牧等行为直接造成了生态系统结构的破坏,导致了生态系统功能失调,碳储存效应降低。2017年,国家严格实施了祁连山自然保护区整治策略,人为不合理的行为被遏制,生态系统结构得以逐渐调控,植被生产力也逐步得以恢复;但受到人为强度干扰后的QLME,要恢复其功能,特别是要增加其碳储存需要一定的时间周期,生态效应存在一定的滞后性。虽然2017年后,针对祁连山生态环境整治的一系列策略得以有效实施,生态功能在一定尺度上得到了恢复,但2018年的碳储存量仍然未达到2015年的碳储存量;调查发现,到2020年8月,祁连山生境已得到了明显修复,各类不利于生态效应发挥的人为活动得到了全面的禁止。目前,天地一体化的信息网络与监测点遍布自然保护区,极大地促进了生态功能的恢复,随着绿色低碳高质量发展理念与模式的推进,未来QLME的碳储存有望进一步增加。

从空间特征而言,由图2可知,QLME碳储存十分丰富,单位面积内碳储存最高值为16260 t·km^{-2}。碳储存高值的区域呈"中部带状—东南部片状"分布,西北部则有零星点状高值区。带状区域是指

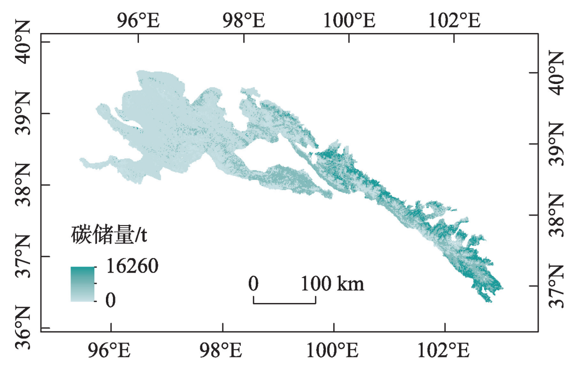


图2　2018年QLME碳储存空间分布特征

Fig. 2　Spatial distribution of QLME carbon storage in 2018

QLME中部区域林地景观与草地景观相互交错分布;东南部片状分布主要是林地景观和草地景观集聚;西北部零星点状区域则大多为祁连山高海拔地区的低覆盖度草地景观。造成QLME碳储存空间差异的原因主要是区域自然地理特征的差异所致。在祁连山地区,不同区域的地形、地貌、土壤、水文与气候特征,孕育了特定的自然地理景观带谱,特别是形成了与之相适应的植物地理类型;如上所述的植被特征,是植物及其生境长期适应的结果,蕴含了生物生产力的累积效应及其空间差异性;而碳储存状况与生物生产力直接相关,这种自然地理的空间变异性就形成了区域碳储存特征的空间差异性。

3.2　不同生态景观类型碳储存特征

研究分析表明,不同生态景观类型蕴含的碳储存不同。以土地利用/覆盖变化为特征的生态景观类型差异,制约着碳储存的时空变化特征。图3反映了1985—2018年研究区不同土地利用类型碳储存变化状况。

从图3可知,QLME碳储存最高为草地、林地,其次为裸地的碳储存,耕地、湿地、建设用地以及农村居民点的碳储存则较小。不同土地利用类型的差异是自然要素与人为要素耦合关系的具体体现,也直接导致碳储存的差异性。区域内草地面积大,成为碳储存的主体;而林地虽然不及草地面积大,但由于碳密度大,也成为QLME的重要碳储存土地利用类型;它们直接反映了以光合作用机制为特征的植被固碳效应。虽然裸地景观的碳密度较小,但由于在研究区生态景观类型中的比例并不小,因而其碳储存占总碳储存的10%~16%左右;同时随着裸地景观不断地恢复为林地、草地以及向其他生态景观类型转化,其碳储存年际变化呈减少趋势,但仍然是重要的碳汇;这是QLME碳储存的重要特征之一。需要指出的是草地景观类型碳储存占研究区碳储存一半以上,1985—2018年内变化明显,其碳储存呈先增加后减少趋势。林地景观类型同样也是研究区重要碳汇,其碳储存占总碳储存的11.31%~36.16%,变化幅度较大。具体而言,1985—2010年林地景观碳储存显著减少,反映了研究区林地一定程度的破坏或退化;而2010年后,林地景观碳储存显著增加,与近几年QLME的生态修复政策的实施直接相关。此外,QLME的湿地景观以草本湿地为主,其碳密度也比较高,但由于其面积较小,故碳储存贡献度相对较小。

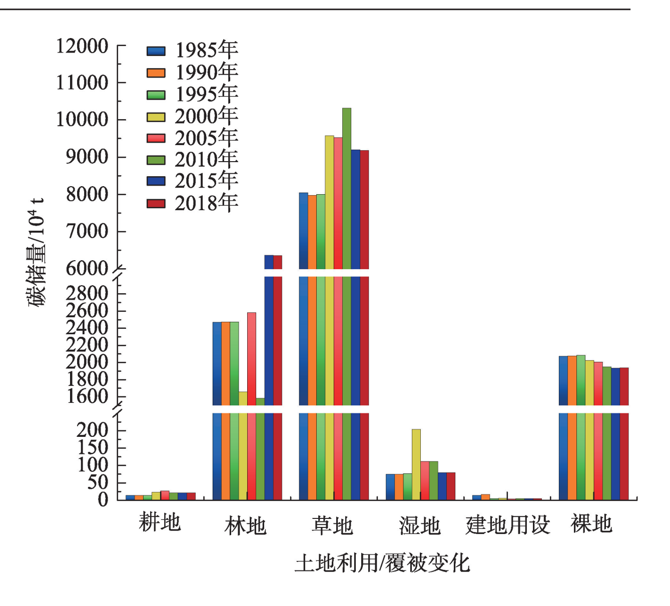


图3　QLME不同年度各景观格局背景下的碳储存特征

Fig. 3　Carbon storage characteristics under different landscape patterns in QLME in different years

4　未来情景下生态系统服务功能特征

4.1　未来生态景观动态变化

基于GeoSOS-FLUS模型的原理与方法,以土地利用类型反映生态景观类型。采用2000年土地利用状况模拟2010年的土地利用覆被情况,并进一步对GeoSOS-FLUS模型进行率定,得到其适宜性概率,然后模拟2015年土地利用状况,同时结合实际土地利用数据进行对比验证。验证结果的Kappa系数为0.72,模拟的整体精度为0.81。结果表明,该模型能较好地模拟出QLME的生态景观类型变化,能

够用于对QLME未来生态景观类型状况的预估。

以QLME2000年和2015年的土地利用作为初始和终止年份，通过Markov Chain模型计算得到各土地利用类型的转移概率，进而预测出2050年QLME的土地利用结构数量。在此基础上，将2018年土地利用数据和驱动因子数据作为GeoSOS-FLUS模型的输入数据，结合目前QLME的客观状况，转换矩阵选用自然保护情景，模拟得到2050年QLME土地利用类型状况。2018—2050年QLME景观类型转移矩阵如表2所示。

由表2可知，2018—2050年QLME的景观类型基本保持不变，仅有少部分区域发生了地类转移，其转移趋势主要向林地、草地以及裸地景观转移。具体而言，耕地有1.96%转化为草地景观，9.8%转化为裸地景观；草地则有8.79%转化为林地景观，有0.18%转化为冰川积雪景观；有1.17%的裸地转化为林地景观，1.09%的裸地恢复为草地景观，还有2.03%的裸地转化为冰川积雪景观。此外，冰川积雪有0.24%转换为草地景观，21.38%则转变为裸地景观。2018—2050年土地覆被转移的空间分布如图4所示。

由于草地和裸地景观面积基数较大，QLME中草地类型转出以及裸地类型的转变十分明显。其中，在QLME的中部和东部地区，大量的草地转变为林地；此外，这些区域的裸地也大量恢复为林地和草地，植被地类面积显著增加。而在QLME的西部高海拔地区，则主要表现为裸地和冰川积雪景观的互相转化，以及冰川积雪景观和裸地恢复为草地，大多为分布零碎的高寒草甸以及低覆盖度草地。整体而言，QLME 2018—2050年土地利用空间变化呈现良好发展态势，林地景观面积范围增加。

表2　2018—2050年QLME土地利用转移矩阵

Tab. 2　QLME land use transfer matrix from 2018 to 2050　/%

2018年	2050年								
	耕地	林地	草地	湿地	水体	建设用地	裸地	雪/冰	总计
耕地	88.24	0	1.96	0	0	0	9.80	0	100
林地	0	100	0	0	0	0	0	0	100
草地	0	8.79	90.97	0.01	0.06	0	0	0.18	100
湿地	0	2.04	0	83.67	2.04	0	12.24	0	100
水体	0	0	0	0	100	0	0	0	100
建设用地	0	0	0	0	0	100	0	0	100
裸地	0	1.17	1.09	0	0.04	0	95.67	2.03	100
雪/冰	0	0	0.24	0	0	0	21.38	78.39	100

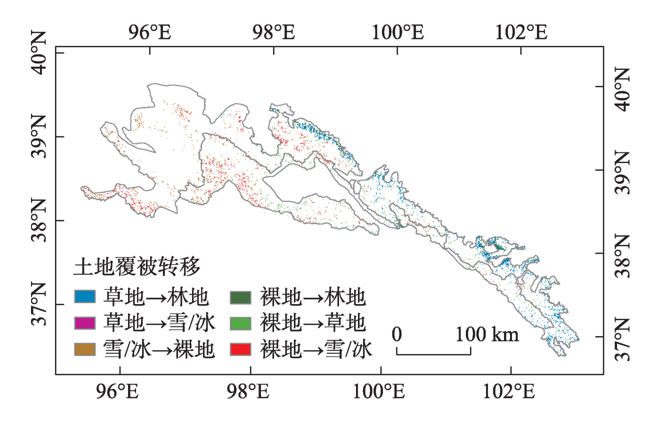


图4　2018—2050年QLME土地利用转移空间分布特征

Fig. 4　Spatial distribution of land use transfer in QLME from 2018 to 2050

4.2　未来情景下QLME碳储存变化

气候模式是开展未来气候变化研究的重要途径之一，近年来一系列气候模式应运而生，如BCC-CSM1.1、CanESM2、GISS-E2-H等[19-20]。特别是近期NDCs及2 ℃以下情景模式的研发，为“一带一路”沿线排放与减排提供了重要借鉴[21]，也为碳源/汇研究提供了重要支撑。考虑到现有模式的模拟能力，本研究基于BCC模式的RCP4.5和RCP8.5气候变化情景模式，根据FLUS模拟预估得到的2050年土地利用类型数据，耦合InVEST模型得到QLME在自然保护情景下2050年的碳储存空间分布（图5）。

由图5可以看出，2050年QLME平均碳储存主要集中在东部和中部的植被覆盖地区。2050年研究区平均碳储存为3813.38 t，较2018年增长率为8.69%，碳储存总量为18941.82×10^4 t，较2018年增

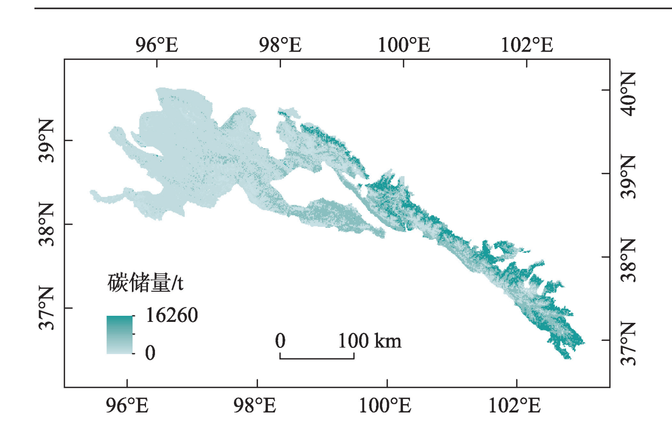


图5 预估2050年QLME碳储存空间分布特征

Fig. 5 Projected carbon storage spacial distribution in QLME in 2050

加了1629.69 t。

QLME碳储存随时间的变化规律如图6所示。可以看出,QLME碳储存呈现增长趋势,特别是在2010年之后对其进行生态修复治理后,碳储存有了显著的提升,而在符合设定的自然保护情景下,QLME的林地面积有了明显增加,因而到2050年碳储存也将有进一步的增加。

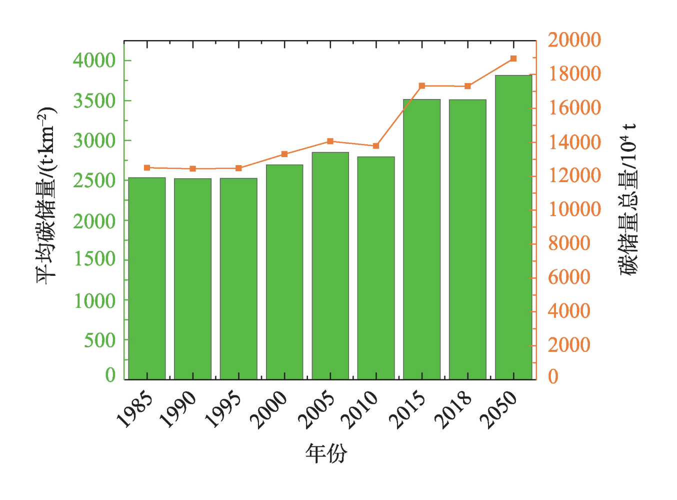


图6 1985—2050年QLME碳储存变化规律

Fig. 6 Change of carbon storage in QLME from 1985 to 2050

5 结 论

祁连山是中国西部重要生态安全屏障、黄河流域重要水源产流地,也是我国生物多样性保护优先区域,国家重点生态功能区及国家公园试点建设区域[22];QLME在维护生态稳定性,保障生态安全方面发挥着不可替代的作用。

特定自然地理背景与土地利用格局下的生态系统发挥着一系列生态服功能能,基于气候变化情景,探索生态系统服务功能模型模拟技术方法[23-24],特别是定量化CSET的拓展,对于认识碳循环与碳固定的特征与规律,具有重要的理论价值与现实意义。本文在解析气候变化及景观格局与生态系统碳储存驱动要素及耦合关系的基础上,基于InVEST模型,分析了QLME碳储存功能的时空演变及其变化规律,同时通过耦合GeoSOS-FLUS模型,预估了未来情景下碳储存功能的变化情况,主要得到如下结论:

(1) 不同时期QLME碳储存有一定差异性。1985—2018年研究区碳储存功能总体上均呈升高趋势,蕴含了自然及人为要素耦合的综合效应。

(2) 不同生态景观类型对应的碳储存差异明显。QLME中,以土地利用所代表的生态景观类型在自然及人为要素驱动下,发生了一系列复杂变化,综合性地反映在碳储存时空特征方面;从不同土地利用/覆被状况来看,碳储存从高到低依次为:草地景观、林地景观、裸地景观、湿地景观和其他地类景观。

(3) 未来气候变化情景下碳储存趋于增加。在现有技术手段下,依据模型的适宜性与可靠性率定与分析方法,QLME 2050年碳储存均有不同程度的增加;特别是基于RCP4.5及RCP8.5情景,2050年碳储存表现为增长趋势。

参考文献(References):

[1] Hein C J, Usman M, Eglinton T I, et al. Millennial-scale hydro-climate control of tropical soil carbon storage[J]. Nature, 2020, 581: 63-66.

[2] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, et al. Carbon pool and flux of global forest ecosystems [J]. Science, 1994, 263: 85.

[3] Keenan T F, Hollinger D Y, Bohrer G, et al. Increase in forest water- use efficiency as atmospheric carbon dioxide concentrations rise[J]. Nature, 2013, 499(7458): 324.

[4] Tian H, Chen G, Liu M, et al. Model estimates of net primary productivity, evapotranspiration, and water use efficiency in the terrestrial ecosystems of the southern United States during 1895-2007[J]. Forest Ecology Management, 2010, 259(7): 1311-1327.

[5] Son K, Lin L, Band L, et al. Modelling the interaction of climate, forest ecosystem, and hydrology to estimate catchment dissolved organic carbon export[J]. Hydrological Processes, 2019, 33(10): 1448-1464.

[6] 李昊, 蔡运龙, 陈睿山, 等. 基于植被遥感的西南喀斯特退耕还

林工程效果评价——以贵州省毕节地区为例[J]. 生态学报, 2011, 31(12): 3255−3264. [Li Hao, Cai Yunlong, Chen Ruishan, et al. Evaluation of the effect of the project of converting farmland to forest in the Karst area of Southwest China based on vegetation remote sensing: A case study of Bijie area in Guizhou Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(12): 3255−3264.]

[7] 李鹏辉, 徐丽萍, 刘笑, 等. 基于三维生态足迹模型的天山北麓绿洲生态安全评价[J]. 干旱区研究, 2020, 37(5): 1337−1345. [Li Penghui, Xu Liping, Liu Xiao, et al. Ecological security evaluation of an oasis in the north of the Tianshan Mountains based on three-dimensional ecological footprint model[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(5): 1337−1345.]

[8] 王让会, 宁虎森, 赵福生. 二氧化碳减排林水土耦合关系及生态安全研究[M]. 北京: 气象出版社, 2021. [Wang Ranghui, Ning Husen, Zhao Fusheng. Study on Coupling Relationship between Soil and Water and Ecological Security of Carbon Dioxide Emission Reduction Forest[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2021.]

[9] 包玉斌, 李婷, 柳辉, 等. 基于InVEST模型的陕北黄土高原水源涵养功能时空变化[J]. 地理研究, 2016, 35(4): 664−676. [Bao Yubin, Li Ting, Liu Hui, et al. Spatiotemporal changes of water conservation function in the Loess Plateau of northern Shaanxi Province based on InVEST model[J]. Geographical Research, 2016, 35(4): 664−676.]

[10] 张福平, 李肖娟, 冯起, 等. 基于InVEST模型的黑河流域上游水源涵养量[J]. 中国沙漠, 2018, 38(6): 1321−1329. [Zhang Fuping, Li Xiaojuan, Feng Qi, et al. Water conservation in the upper reaches of the Heihe River Basin based on InVEST model[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(6): 1321−1329.]

[11] 魏星涛. 基于InVEST模型的祁连山南坡水源涵养功能研究[D]. 西宁: 青海师范大学, 2018. [Wei Xingtao. Study on Water Conservation Function of the Southern Slope of Qilian Mountains Based on InVEST Model[D]. Xining: Qinghai Normal University, 2018.]

[12] Clerici N, Paracchini M L, Maes J. Land-cover change dynamics and insights into ecosystem services in European stream riparian zones[J]. Ecohydrology and Hydrobiology, 2014, 14(2): 107−120.

[13] Runting R K, Bryan B A, Dee L E, et al. Incorporating climate change into ecosystem service assessments and decisions: A review [J]. Global Change Biology, 2017, 23(1): 28−41.

[14] 钱大文, 曹广民, 杜岩功, 等. 2000—2015年祁连山南坡生态系统服务价值时空变化[J]. 生态学报, 2020, 40(4): 1392−1404. [Qian Dawei, Cao Guangmin, Du Yangong, et al. Temporal and spatial variation of ecosystem service value on the southern slope of the Qilian Mountains from 2000 to 2015[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(4): 1392−1404.]

[15] 王涛, 高峰, 王宝, 等. 祁连山生态保护与修复的现状问题与建议[J]. 冰川冻土, 2017, 39(2): 229−234. [Wang Tao, Gao Feng, Wang Bao, et al. Current situation, problems and suggestions of ecological protection and restoration in Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(2): 229−234.]

[16] 程文举, 席海洋, 司建华, 等. 河西内陆河浅山区流域蒸散发估算及干旱特性研究[J]. 干旱区研究, 2020, 37(5): 1105−1115. [Cheng Wenju, Xi Haiyang, Si Jianhua, et al. Study of evapotranspiration estimation and drought characteristics of watershed in low coteau area of Hexi inland river[J]. Arid Zone Research, 2020, 37 (5): 1105−1115.]

[17] 付双喜, 张洪芬, 杨丽杰, 等. 地形影响下祁连山北麓不同类型降水特征对比分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1226−1234. [Fu Shuangxi, Zhang Hongfen, Yang Lijie, et al. Comparative analysis of different types of precipitation characteristics in the northern foot of Qilian Mountain under the influence of topography[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(5): 1226−1234.]

[18] 马蓉蓉, 黄雨晗, 周伟, 等. 祁连山山水林田湖草生态保护与修复的探索与实践[J]. 生态学报, 2019, 39(23): 8990−8997. [Ma Rongrong, Huang Yuhan, Zhou Wei, et al. Exploration and practice of ecological protection and restoration about mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands in the Qilian Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(23): 8990−8997.]

[19] Russo S, Dosio A, Graversen R G, et al. Magnitude of extreme heat waves in present climate and their projection in a warming world [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2014, 19(22): 12500−12512.

[20] Jiang Z, Li W, Xu J, et al. Extreme precipitation indices over China in CMIP5 models. part I: Model evaluation[J]. Journal of Climate, 2015, 28(21): 8603−8619.

[21] Chai Qimin, Fu Sha, Wen Xinyuan, et al. Modeling the implementation of NDCs and the scenarios below 2 ℃ for the Belt and Road countries[J]. Ecosystem Health and Sustainability, 2020, 6(1): 1766998.

[22] 徐洁, 谢高地, 肖玉, 等. 国家重点生态功能区生态环境质量变化动态分析[J]. 生态学报, 2019, 39(9): 3039−3050. [Xu Jie, Xie Gaodi, Xiao Yu, et al. Dynamic analysis of eco-environmental quality in key ecological function areas of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(9): 3039−3050.]

[23] 王让会. 城市生态资产评估与环境危机管理[M]. 北京: 气象出版社, 2008. [Wang Ranghui. Evaluation of Urban Ecological Assets and Environmental Crisis Management[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2008.]

[24] Wu Z, Dai E, Ge Q, et al. Modelling the integrated effects of land use and climate change scenarios on forest ecosystem aboveground biomass, a case study in Taihe County of China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27(2): 205−222.

The relationship of climate change and landscape pattern with ecosystem carbon storage: A case study from the Qilian Mountains

WANG Ranghui, ZHAO Wenfei, PENG Qing, LIU Chunwei,
ZHOU Limin, TIAN Chang
(School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China)

Abstract: Climate change and landscape pattern are closely related to the structure, function, and dynamic changes of an ecosystem. The Qilian Mountain Ecosystem (QLME) is an important ecological area in China. Based on multivariate data and using remote sensing and GIS technology combined with InVEST and GeoSOS-FLUS models, the technology and method of estimating carbon storage in the QLME was explored. Consequently, an estimation of carbon storage in the QLME was achieved. According to quantitative estimation and analysis, carbon storage in the QLME showed obvious spatial and temporal differences due to different landscape types. The highest QLME carbon storage was in grassland and woodland followed by in bare land. The carbon storage of cultivated land, wetland, construction land, and rural residential sites was low. From 1985 to 2018, QLME carbon storage increased overall by 4805.95 million tons with an annual growth rate of 38.43%. Grassland carbon storage accounted for more than half of the study area and its carbon storage increased at first before decreasing. Forest landscape carbon storage accounted for 11.31%−36.16% of total carbon storage had a wide range of variation. Based on the future RCP4.5 and RCP8.5 climate change scenarios, the carbon storage of the QLME tended to increase; average carbon storage was estimated at 3813.38 tons for 2050, which would represent a growth rate of 8.69% from the rate in 2018. This study is important for improving understanding of the carbon cycle and ecosystem stability.

Keywords: Qilian Mountain Ecosystem(QLME); climate change scenario; carbon storage estimation techniques (CSET); ecosystem service value assessment technology; landscape pattern; model